

Topografins inverkan på markvattenhalten i ett jordbruksdominerat avrinningsområde

*The topographic impact on soil water content in an
agricultural catchment*

Olof Haraldsson



Magisteruppsats i markvetenskap
Naturresursprogrammet – biologi och mark

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2015:01

Uppsala 2015

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Olof Haraldsson

Topografins inverkan på markvattenhalten i ett jordbruksdominerat avrinningsområde
The topographic impact on soil water content in an agricultural catchment

Handledare: Barbro Ulén, institutionen för mark och miljö, SLU
Biträdande handledare: Faruk Djodjic, institutionen för vatten och miljö, SLU
Examinator: Lars Bergström, institutionen för mark och miljö, SLU

EX0429, Självständigt arbete i markvetenskap – magisterarbete, 30 hp, Avancerad nivå A1E (D-nivå)
Naturresursprogrammet - biologi och mark 240 hp

Serienamn: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2015:01

Uppsala 2015

Nyckelord: topografi, jordbrukslandskap, markvattenhalt, dränering, avrinningsområde

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Omslag: Karta på topografin i avrinningsområdet. Ju mörkare färg desto högre höjd över havet ligger marken.

Abstract

Topography is an important parameter for catchment hydrology, since it is a driver for water flow. Moreover, topography serves as a basis for hydrological models, e.g. 'Top-model', which is based on a topographical wetness index (TWI). Few studies of TWI have been conducted on agricultural catchment scale.

Four fields were studied in a Swedish drained agricultural catchment in order to evaluate the influence of topography on soil wetness. Average slope for the four fields was 4.0-9.4 degrees and the TWI index was found to vary between 2.6 and 14.2 in 820 measuring points.

Calculated TWI values were not correlated to the measured water content for each point. However, some of the fields had significantly different TWI values compared with others soon after snowmelt. The complexity of the relationship between TWI, topography and other factors, including the existence of tile drains, is discussed in this report.

Sammanfattning

I ett landskap har topografi en stor betydelse för vattenflödet och är därmed en viktig parameter för markvattenhalten i olika delar av ett avrinningsområde. Topografin är också en viktig parameter för många hydrologiska modeller såsom Top-model, vilken är baserad på ett topografiskt våtindex (TWI). Även fast det har gjorts en del studier på TWI, framför allt i skogsmark, så är det få som har gjorts på TWI i ett avrinningsområde som domineras av dränerad jordbruksmark.

Fyra fält med varierad topografi har studerats i ett avrinningsområde i ett svenskt dränerat jordbrukslandskap. Detta för att komma fram till hur stor påverkan topografin har på vattenhalten i jorden. En genomsnittlig lutning för de fyra fälten var 4,5-8,3 grader och TWI varierade mellan 2,6 och 14,2 i 820 olika mätpunkter.

Beräknade TWI-värden stämde inte överens med den uppmätta vattenhalten för varje punkt. Vissa av fälten hade en signifikant skillnad vid jämförelse med varandra vid ett måttillfälle strax efter snösmältningen. Den komplexa relationen mellan TWI, topografi och andra faktorer, inklusive att det finns dräneringsrör diskuteras i arbetet.

Innehållsförteckning

Inledning.....	4
Syfte	4
Vattenflöden i avrinningsområde	5
Vattnets rörelse på och i marken	5
Jordmån - Markvattnet	6
Topografiskt index TWI, relaterat till uppströmsarea	7
Material och Metod	8
Avrinningsområdet	8
Fältmätningar av markfuktighet	9
Markfuktighetsmätare HH.....	9
Markfuktighetsmätare TDR	9
Dräneringsintensiteten.....	10
Hydraulisk konduktivitet.....	10
TWI, uppströmsarea	11
Vattnets riktning med D8-beräkning.....	11
Vattnets riktning med D_{∞} beräkning	12
Vattnets riktning med MD8 beräkning.....	12
Uträkning av TWI	12
Resultat.....	13
Vattnets riktning med D8	13
Vattenhalten i marken vid tidpunkt 1 och 2	14
De fyra fältens TWI.....	16
Jämförelse mellan TWI och Vattenhalten	16
Ackumulerade uppströmsarean	19
Lutningen	20
Dränering samt hydraulisk konduktivitet	21
Diskussion	22
Slutsats	23
Tackord.....	23
Referenser.....	24
Appendix	26

Inledning

I ett landskap rör sig vatten normalt sätt från högre till lägre terräng. Detta behöver ändå inte betyda att sänkorna alltid är blötast i dränerade jordbruksområden. Ifall man kan förutsäga hur vattnet kommer att röra sig i ett landskap så kan man förutspå hur en markprofil ser ut med avseende på vatten. Hur rör sig vattnet i en jordbruksmark och var skulle det största behovet av dränering vara?

Optimalt för växters välbefinnande är att det ska finnas både luft och vatten i jorden. Bra lufttillgång i jorden gynnar växters rotaktivitet, vilket dessutom medför att viktiga näringsämnen blir tillgängliga för växten. Lufttillgången minskar även risken för att patogener ska kunna attackera växten. Vilken jordart det är, samt hur mycket ler som jorden innehåller, har en stor betydelse för markvattenhalten i jorden (Szeba *m.fl.*, 2009).

I början av växtsäsongen finns en överhängande risk att marken är alltför vattenfylld för att jorden ska kunna bearbetas inför vårsådden. Det gäller speciellt om vattnet haft svårt att infiltrera på grund av att det har varit mycket snö under vintern och tjälen i marken varit djup. Det är först när tjälen har försvunnit som vattentransporten i marken kommer igång ordentligt. Vid problem med mycket stående vatten är det lämpligt att dränera marken eller förbättra den befintliga dräneringen. Fördelen med att ta bort överflödigt vatten är att växtsäsongen kan påbörjas tidigare, och att grödans rötter utvecklas bättre vilket leder till en ökad produktion. En mer anpassad infiltration i marken kan också innebära att transporten av växtnäring, framförallt fosfor, till vattendragen minskar genom att ytvavrinningsförluster minskar.

I detta examensarbete utfördes fältmätningar av markfuktigheten vid två olika tidpunkter på fyra jordbruksfält inom ett mindre jordbruksdominerat avrinningsområde, där man sedan 1978 studerat transport av växtnäring. Avrinningsområdet kommer i denna rapport att kallas för E23. Den teoretiska markvattenhalten, TWI (topografiskt våtindex), har beräknats med hjälp av höjddata i kartprogrammet GIS. Liknande studier har tidigare gjorts på skogsmark, men inte i ett jordbrukslandskap där man även måste ta hänsyn till dräneringsrören.

Syfte

Syftet med studien har varit att jämföra den teoretiska markvattenhalten i en svensk jordbruksmark med praktiskt uppmätta värden samt att om möjligt relatera beräknade TWI-värden med förhållandena i avrinningsområdet.

Vattenflöden i avrinningsområden

Allt vatten som genom regn eller snösmältning når marken i ett avrinningsområde, förutom det som avdunstar, rinner till slut ut ur avrinningsområdet genom en och samma punkt. Ett avrinningsområde kan delas upp i två delar beroende på infiltrations- och grundvattenförhållanden; i ett inströmningsområde rinner nederbörden ner till grundvattnet vars magasin fylls på, och i ett utströmningsområde strömmar grundvattnet ut. Avrinningsområdet avgränsas av en ytvattendelare och en grundvattendelare. Ytvattendelare styrs av topografin i terrängen och vattnet rinner i den riktning som marken sluttar. En grundvattendelare styr vilken riktning som grundvattnet rinner åt och den kan inte ses från marknivå men den brukar till stor del följa ytvattendelaren, ibland dock en aning förskjuten. Ju närmare ytan som grundvattendelaren ligger, desto större chans är det att den är densamma som ytvattendelaren. I Sverige är det ganska vanligt att dessa båda stämmer överens (Grip och Rodhe, 2000).

I Sverige är nederbörden störst under sommaren men eftersom evapotranspirationen (avdunstning) också är som störst då sker istället den största vattentillförsel till marken under vinterhalvåret. Under snösmältningen kan det tillföras extra mycket vatten och det är oftast då som marken är som mest vattenfylld och grundvattenytan står som högst. Det finns flera olika sätt att mäta hur lång tid det tar för vattnet att transporteras. Tiden det tar för en partikel att komma in i det aktuella området tills att den lämnat området kallas för transittid. Den tid som en partikel i genomsnitt vistas i området innan den kommer ut kallas för uppehållstid. Hur lång tid det tar innan allt vatten i genomsnitt är utbytt kallas för omsättningstid (Grip och Rodhe, 2000).

Vattnets rörelse på och i marken

Det finns två olika sorters vattenflöde; mättat och omättat, varav omättat flöde är vanligast (Singer och Munns, 1992). Om det regnar med en högre intensitet än vad vattnet i jorden klarar av att rinna undan i utströmningsområdet, så kommer marken till slut bli helt vattenfylld och marken räknas då som mättad. Då marken är mättad kommer det istället ske ytavrinning. Även vid en omättad jord kan det ske ytavrinning, dels ifall det faller regn med en intensitet som är större än jordens infiltrationskapacitet samt även på en sluttande mark är det inte ovanligt att vattnet rinner ovanpå jorden istället för genom den. (Grip och Rodhe, 2000). Vid omättat flöde är delar av jorden luftfylld och det är då skillnaden i matrisens potential samt den specifika jordens egenskaper som bestämmer infiltrationen. I en mättad jord är det istället läges- och tryckpotentialen som har störst inverkan på infiltrationshastigheten. Det finns inga definitiva regler för hur vatten rör sig i marken utan det kan röra sig i alla tänkbara riktningar. (Singer och Munns, 1992).

Hur grundvattnet rör sig i marken kan visas genom att mäta den totala vattenpotentialen på olika djup. Precis som en boll som vill röra sig till minsta möjliga energinivå vill även vattnet röra sig från hög potential till lägsta möjliga potential. Om potentialen blir lägre ju längre ner i jorden man kommer så tyder detta på att det är ett inströmningsområde (Grip och Rodhe, 2000). Den totala vattenpotentialen är uppbyggd av olika sorters potentialer: läges-, tryck-, matris- och osmotiska potentialer enligt ekvationen nedan. Även strukturen på marken har betydelse, då mängden hinder och friktion i vattnets väg är avgörande för flödet. Vid hög vattenhalt i marken kan vattnet röra sig mer obehindrat än vid låg vattenhalt (Singer och Munns, 1992).

$$\Psi_{\text{total}} = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m$$

Ψ_{total} = vattnets totala potential

Ψ_g = lägespotential, dvs. gravitationen som trycker vattnet neråt.

Ψ_p = tryckpotential, dvs. hur vattnet flödar för att ha så lite tryck på sig som möjligt.

Ψ_s = osmotisk potential, dvs. hur vattnet förflyttar sig för att utjämna koncentrationen av salter så att koncentrationen är lika stor överallt.

Ψ_m = jordmatrisens potential, dvs. hur vattnet förflyttar sig från blötare till torrare områden, samt från större till mindre porer.

Jordmån - Markvattnet

Markens porer är fyllda antingen med vatten eller med luft. Ju mindre porerna är desto hårdare binder de vatten till sig. De större porerna binder inte till sig vatten lika hårt, så när marken torkar upp är det de stora porerna som först tappar vatten och därefter innehåller förhållandevis mycket luft. Man kan generellt också säga att vattnet rör sig snabbare i jordar med större porer. Detta beror bland annat just på att mindre porer drar åt sig vattnet effektivare vilket innebär att vattnet bromsas upp mer (Singer och Munns, 1992). Teorin stämmer dock inte alltid överens med verkligheten. En jord som innehåller mycket ler, dvs. har många små porer, borde ha en långsam infiltration, men detta är inte alltid fallet. I en lerjord som torkar upp kan det nämligen ofta bildas sprickor och vattnet kan därmed rinna ner i sprickorna utan att komma i kontakt med jordmatrisen och därmed få en hög infiltration (Eriksson *m.fl.*, 2005). Huruvida porerna är vatten- eller luftfyllda beror till största del på hur blött respektive torrt det är i marken. Ju blötare det är, desto fler porer är vattenfyllda och ju torrare desto fler porer är luftfyllda (Singer och Munns, 1992). Ur ett växtodlingsperspektiv är det viktigt att det finns både luft och vatten i markens porer för att växterna ska överleva (Eriksson *m.fl.*, 2005).

Det finns ett index som används för att beräkna hur pass stor del av jorden som kan

vattenfyllas: porositeten (p) = $(1 - \frac{P_b}{P_p}) * 100$

Där Porositeten (p) = den volym av en jord som utgörs av luft- och vattenfyllda mellanrum mellan jordpartiklarna

P_b = torra skrymdensiteten

P_p = kompaktdensiteten

För att vatten ska infiltrera i makroporer krävs det att den omgivande jordmatrisens potential är större än trycket som krävs för att vattnet ska ta sig in i makroporerna. Hur lätt detta sker beror på många olika faktorer bl. a. vattnets ytspänning samt markens utformning vid den aktuella platsen. Makroporernas betydelse upptäcktes vid slutet av 1800-talet och slutsatsen var att vatten rann genom dessa porer redan innan jorden blivit helt mättad. Oftast sker detta vid ihärdiga regn och då vatten samlats på markytan. Man kan inte bestämma att makroflöde sker vid någon specifik porstorlek. Det är inte bara porerna storlek som spelar roll utan även hur porerna är formade. Skillnaden i vattenpotential är bara obetydligt större vid makroporsflöde än vid matrisflöde men däremot är markens vattengenomsläpplighet betydligt större (Jarvis, 2007).

En jords förmåga att binda vatten har olika beteckningar. Maximal vattenkapacitet innebär att den maximala mängden vatten redan finns i jorden. Fältkapacitet innebär att marken nått en jämviktsstatus och om det varken tillförs eller försvinner något vatten så rör sig vattnet varken uppåt eller nedåt i jordprofilen. Tillgängligt vatten för växterna motsvaras av skillnaden mellan maximal vattenkapacitet och fältkapaciteten (Eriksson *m.fl.*, 2005).

Topografiskt index TWI, relaterat till uppströmsarea

För att lättare förutspå var i marken det är blötare har man försökt skapa en modell som ska kunna visa detta. En av de stora utmaningarna är att alla system är väldigt komplexa och även vid väldigt många parametrar så blir det ändå en förenkling av verkligheten (Beven och Kirkby, 1979). En av de mest använda modellerna är den för uträkning av topographic wetness index vanligtvis förkortat TWI. Med hjälp av digitala höjddata kan man beräkna detta enligt formeln:

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan \beta}$$

där

$$a = \frac{A}{L}$$

A = den ackumulerade uppströmsarean för en punkt

L = bredden på tvärsnittet

Tan β = den lokala lutningen i just den punkten

(Quinn *m.fl.*, 1995).

Det finns många olika studier inom TWI, men de studierna är inte gjorda i ett jordbrukslandskap. I ett försök av Rodhe och Seibert (1999) försökte de testa om det gick att förutse var sankmarker var lokaliserade i två separata skogsområden i Sverige. I det ena skogsområdet som hade en tydligt kuperad terräng kunde man hitta ett samband även om det inte alltid stämde. Däremot i det andra skogsområdet som inte var lika kuperat utan hade en flackare terräng så kunde man inte se något samband alls. Förklaringen till den dåliga överensstämmelsen ansågs vara att den digitala höjddatans upplösning var 50x50m och att detta ansågs vara för oexakt då denna terräng inte hade lika stor skillnad i topografin.

Townsend och Walsh (1996) diskuterade hur pass stor roll som lokala variationer spelade in för TWI. De jämförde två TWI-modeller varav den ena förutsattes ha en likadan marksammansättning för hela området. Den andra TWI-modellen tog däremot hänsyn till t.ex. markens djup till berggrund samt jordarternas mättade hydrauliska konduktivitet. Vad de kom fram till var att de båda studierna visade ungefär samma resultat och detta förklarade de med att jordarten antogs ändra sig med topografin. De kom även fram till att där jorden hade en låg genomsläpplighet gav den TWI-modell som antog en homogen marksammansättning ett förhållandevis lågt värde. I områden med en hög genomsläpplighet gav beräkningar med samma modell förhållandevis höga värden.

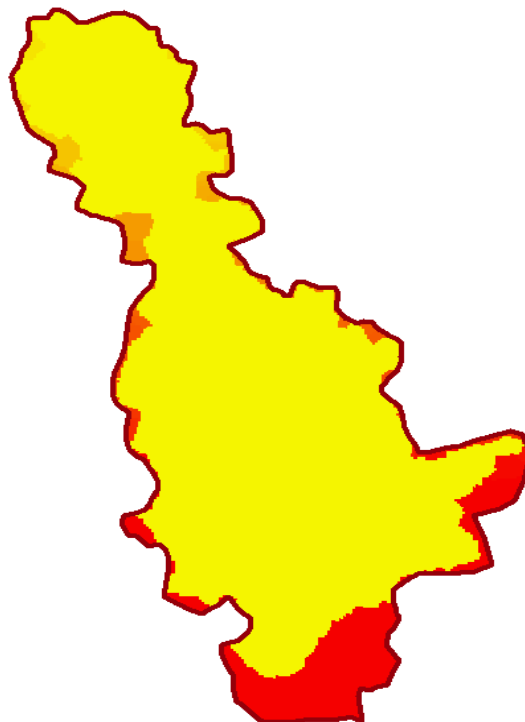
En studie som gjordes i Australien av Grayson *m.fl.*, 1997 undersöktes ett område där de yttre förhållandena varierade kraftig under årets gång. Delar av året var väldigt blött medan andra delar var väldigt torrt. Det visade sig att TWI gav ett bättre resultat under den blöta perioden än under den torra perioden.

Material och Metod

Avrinningsområdet

Avrinningsområde E23 (732 ha) har ett kuperat landskap med relativt små skiften. Jordarten är styv lerjord (Ulén *m.fl.*, 2011) förutom på toppen av kullarna som till största delen består av morän. Av den totala arealen är 53 % åkermark. Ungefär 50 % av åkerarealen i avrinningsområdet odlas med spannmål, medan vall och träda utgör ungefär 30 %. Området började studeras för att finna ett samband mellan hur brukningen av jorden korrelerade med växtnäringsförluster till vattendragen. Syftet var att få ökad kunskap och därmed få bättre insikt om vilka odlingsåtgärder som var mest effektiva för att över tiden lyckas minska näringsläckagen. Vattenkemisk provtagning började 1988 och höll på fram till 1995, för att efter ett avbrott återupptas 2002. Sedan 2007 ingår även området i ett projekt med namnet Greppa Fosfor med syfte att lantbrukarna skall göra åtgärder för att minska fosfortransporten till vattendragen (Ulén *m.fl.*, 2011). De fyra fälten som valdes ut för denna studie var stora, till viss del kuperade och hade vid mätillfällena varierande grödor och jordbearbetning (se Tabell 1). Med hjälp av GIS har ett teoretiskt vattenavrinningsområde beräknats vilket skiljer sig en del från det faktiska (Figur 1).

Figur 1: Kartan representerar det faktiska avrinningsområdet medan färgerna visar hur avrinningsområdet ser ut om man använder sig av flödesriktningarna i ArcGIS. Varje färg i bilden representerar olika avrinningsområden.



Tabell 1. Odlade grödor på fält 1-4 vid de två olika mättillfällena.

	Fält 1	Fält 2	Fält 3	Fält 4
Mättillfälle 1 6-8 april	Direktsådd av höst- vete efter åkerböna hösten 2008	Höstplöjt	Höstplöjt	Stubb + insådd
Mättillfälle 2 11-13 maj	Höstvete	Nysådd åkerböna	Vårsådd av korn	Vall

Fältmätningar av markfuktighet

I fält registrerades varje mätpunkt med hjälp av en GPS av märket Garmin. Koordinaterna i GPS:en var i koordinatsystemet RT90. I GPS:en fanns även en höjdmätare som kunde mäta altituden, men tyvärr var denna inte tillräckligt tillförlitlig. Vid två olika tidpunkter visade GPS:en helt olika höjder på samma ställe. För att jämföra höjdskillnaden på fälten användes istället digitala höjdkartor som fanns i GIS.

Markfuktigheten mättes i fält vid två tillfällen; första mättillfället (6-8 april) var i anslutning till snösmältningen då tjälen just hade släppt. Vattenhalten mättes vid ytan med hjälp av en Hydrulic head (HH)-reader. Vid andra tillfället (11-13 maj) mättes vattenhalten med en Time Domain Reflectometer (TDR). Denna mätning gjordes på fyra olika djup; 0-10, 10-20, 20-30 och 30-40cm.

Markfuktighetsmätare HH

Vid första mättillfället användes en Moisture Meter (HH2) för att mäta vattenhalten i markens ytlager. Det var inga på förhand bestämda koordinater, utan i fält försöktes mätpunkterna fördelades så jämt som möjligt över de fyra fälten. Hänsyn togs till att alla mätpunkter skulle vara förhållandevis lika, så att mätosäkerheten därigenom minimerades. Vissa av fälten hade en skrovlig och torr yta och för att undvika att de uppmätta värdena skulle bli mindre än de egentligen var gjordes mätningarna ofta under mindre stenar som det fanns gott om på fältet. Ytan där mätningarna gjordes blev därmed inte längre lika skrovlig utan hade en jämnare ytstruktur. På plöjda fält mättes vattenhalten konstant nere i fåran.

Markfuktighetsmätare TDR

Vid andra mättillfället användes en Profile Probe. Profile Probe skapar en signal på 100MHz som når ungefär 10 cm ner i jorden. Det elektromagnetiska fältet passerar genom det skyddande skalet och permittiviteten kan utläsas. Permittivitet är en fysikalisk storhet som beskriver hur man genom att sända ut ett elektriskt fält påverkar samt påverkas av sin omgivning. De olika materialen luft, vatten och jord har olika permittivitet. Då vatten har mycket högre permittivitet än luft och jord dominerar denna stort och på så vis kan man se hur mycket vatten det är jämfört med luft och jord. Instrumentet består delvis av en 50cm lång sensor som man sticker ner i marken. Sensorn är uppdelad i fyra stycken partier, 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm och 30-40cm. Man kan således välja att få fyra olika vattenhalter vid samma mätning.

För att öka säkerheten på mätningarna mättes varje punkt tre gånger, och inför varje mätning vreds Profile Probe 120 grader. Av dessa tre värden togs sedan ett medelvärde. För att få ner Profile Probe 40 cm i marken användes en handborr som slogs ner med en slägga, på så vis uppkom ett hål där Profile Probe stoppades ner. På vissa ställen var jorden väldigt lerrik och det var svårt att få ner borren tillräckligt långt. Vid en mätpunkt på fält nr 3 var marken för blöt för att Profile Probe skulle kunna komma ner till det största djupet.

Då jordarna var relativt steniga och varierande användes en generell inställning på Profile Probe.

Dräneringsintensiteten

Till fält 1-3 fanns dräneringskartor i GIS format till förfogande och den totala längden på dräneringsrören i fältet beräknades. Den del av fältet som inte hade dräneringsrör räknades in i den totala ytan. Från detta kunde medelavståndet mellan dräneringsrören på de olika fälten beräknas enligt formeln: $\frac{\text{Fältets area}}{\text{Dräneringsrörens längd}}$. Detta kunde sedan jämföras med hur blöta fälten var.

Hydraulisk konduktivitet

I mitten på samtliga fält mättes även den hydrauliska konduktiviteten med den s.k. omvända borrhålsmetoden baserat på van Beers (1983). Detta utfördes genom att borra ett hål och fylla det med vatten. Genom att se hur snabbt vattnet rann undan kunde det utläsas vilken genomsläpplighet marken i de olika fälten har.

$$Q = -K * A * \frac{d\phi}{dx}$$

där

Q = vattenförlust

A = tvärsnittsarea

K = jordens hydrauliska konduktivitet

ϕ = vattnets totala potential

x = sträcka

$\frac{d\phi}{dx}$ = ändring i totalpotential per längdenhet

(Grip och Rodhe, 2000)

TWI, uppströmsarea

Från formeln $TWI = \ln \frac{a}{\tan \beta}$ användes digitala höjddata för att i varje punkt få fram den

lokala lutningen samt den ackumulerade uppströmsarean. För att få fram den ackumulerade uppströmsarean måste man först bestämma vilken riktning som vattnet har i varje punkt. Det finns ett par olika metoder att använda för att bestämma vilken riktning som vattnet ska rinna. I en del modeller kan vattnet endast rinna till en cell medan i andra modeller kan vattnet rinna till flera olika rutor. I den här studien har metoden D8 (eight directions) använts, men även ett par andra metoder har beskrivits för jämförelse. Generellt för alla är att den digitala höjddatan delades in i ett stort rutnät med åtta intilliggande rutor. Detta innebär att det finns åtta olika möjligheter för vattnet att rinna (Figur 2), (Tarboton, 1997).

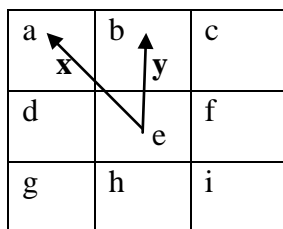
32	64	128
16	Aktuell ruta	1
8	4	2

Figur 2: Schematisk bild över hur bestämning av flödesriktning fungerar. Om en cell får t.ex. värdet 64 betyder detta att vattnet rinner norrut på kartan och har ett värde två så rinner det åt sydost etc.

Vattnets riktning med D8-beräkning

En av de vanligaste modellerna är D8, där man antar att vattnet i varje cell kan rinna till endast en ny cell (O'Callaghan och Mark, 1984). När man bestämmer vilken riktning som vattnet ska ta använder man sig av den cell där höjdskillnaden är som störst i förhållande till avståndet. Avståndet mellan två rutor beräknas från den ena rutans mittpunkt till den andra rutans mittpunkt. Detta innebär att avståndet till en ruta som ligger diagonalt är större än för en ruta som ligger kloss mot kloss (Figur 3). Detta enligt följande formel:

Maximal skillnad = skillnad i höjdmeter / avstånd mellan celler



Figur 3: Från ruta e kan vattnet rinna till någon av de andra åtta rutorna (a, b, c, d, f, g, h och i). Sträckan från origo i ruta e till origo i ruta a har vi nämnt att kalla avstånd x, medan sträckan från origo i ruta e till origo i ruta b har fått benämningen avstånd y. Då rutorna a och e ligger diagonalt mot varandra är avstånd x större än avstånd y. Så även om höjdskillnaden skulle vara större mellan a och e än mellan b och e betyder detta nödvändigtvis inte att vattnet antas ta denna väg då avståndet är längre.

Vattnets riktning med D^∞ beräkning

D^∞ modellen påminner mycket om D8-modellen. Liksom D8 har även D^∞ åtta olika riktningar som vattnet kan välja. Skillnaden är att vid uträkandet av vilken riktning som vattnet kommer ta så används inte bara åtta tänkbara riktningar utan istället alla möjliga vinklar mellan 0 och 2π , dvs. oändligt många. Den riktning som har den brantaste lutningen avgör vilken riktning vattnet får. Flödesriktningen blir sedan den av de åtta riktningarna som moturs är närmast den brantaste lutningen (Tarboton, 1997).

Vattnets riktning med MD8 beräkning

För MD8 (Multiple flow direction) antas liksom för D8 att det finns åtta olika vägar som vattnet kan ta, men till skillnad från D8 räknar man med att allt vatten inte nödvändigtvis måste ta samma väg. Alla riktningar som ligger längre ner i terrängen än den befintliga får en beräknad andel av vattnet. Hur mycket varje riktning får beror på hur stor lutningen är i förhållande till de andra lutningarna (Quinn *m.fl.*, 1991). En nackdel med denna modell jämfört med D8 är att den är svårare för ett dataprogram såsom t.ex. ArcGIS att lyckas genomföra (Seibert *m.fl.* 2007).

Uträkning av TWI

Efter att flödesriktningen är bestämd kan man sedan bestämma den ackumulerade uppströmsarean. Enligt Tarboton (1997) så ska även den aktuella rutan räknas in när den ackumulerade uppströmsarean räknas ut. Då varje cell i griden är 20x20m så måste man multiplicera värdet man får med 400 för att få den ackumulerade arean. För att sedan dividera med L, tvärsnittslängden som i detta fall är 20m.

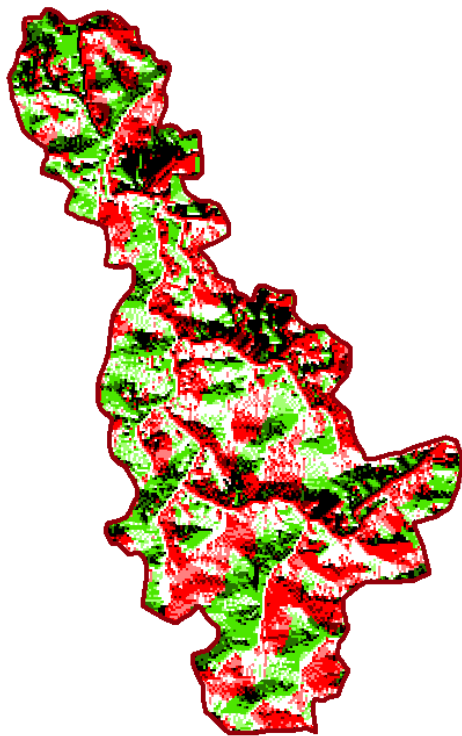
Fältmätningarna av markvattenhalten jämfördes med TWI-värdena från samma punkt för att försöka kunna hitta ett samband. Då den ackumulerade uppströmsarean har en väldigt stor standardavvikelse användes istället ett logaritmiskt värde av den ackumulerade uppströmsarean för relationen med TWI. Detta gör det lättare att få ett tydligare samband. De olika fälten jämfördes med varandra genom 2-sample t-test med t-värdet 1,96 som gräns för 10 % för marginell signifikans 5 % konfidensintervall (signifikant skillnad) för signifikans och 1 % för hög signifikans.

Resultat

Resultaten är till största del inriktade på jämförelser mellan det uträknade TWI-värdet, den uppmätta markvattenhalten samt den ackumulerade uppströmsarean. Därutöver redovisas även dräneringsrörens längd, lutningen i fältet och den hydrauliska konduktiviteten.

Vattnets riktning med D8

En nackdel med denna metod är att väldigt många celler får värdet noll. Men det är ändå en metod som används mycket då den är mycket enkel att genomföra i ArcGIS. I Figur 4 kan man se hur flödesriktningen är enligt denna modell.



Ljusrött	Vit	Ljusgrönt
Rött	Aktuell ruta	Grönt
Mörkrött	Svart	Mörkgrönt

Figur 4: Flödesriktningen i avrinningsområdet. De olika färgerna beskriver vilken riktning som vattnet beräknas att ta uträknat från den digitala höjddatan. Färgen anger vilken riktningen från den 'aktuella rutan' (se rutmönstret till höger om kartan). Rött innebär att vattnet rinner rakt västerut, grönt att vattnet rinner rakt österut, vit att vattnet rinner rakt norrut och svart att vattnet rinner rakt söderut.

I den teoretiska beräkningen av avrinningsområdet medför ett högre TWI-värde att marken förväntas vara blötare. Vid sammanfattning av parametrarna kan man konstatera att det TWI blir som störst när: A (Areal) är så stor som möjligt samt när β (vinkeln) och L (tvärsnittslängden) är så liten som möjligt. I denna studie har L ett värde av 20 i samtliga fall. Punkter uppmätta med GPS visar alltid en viss felmarginal, detta har gjort att en del uppmätta

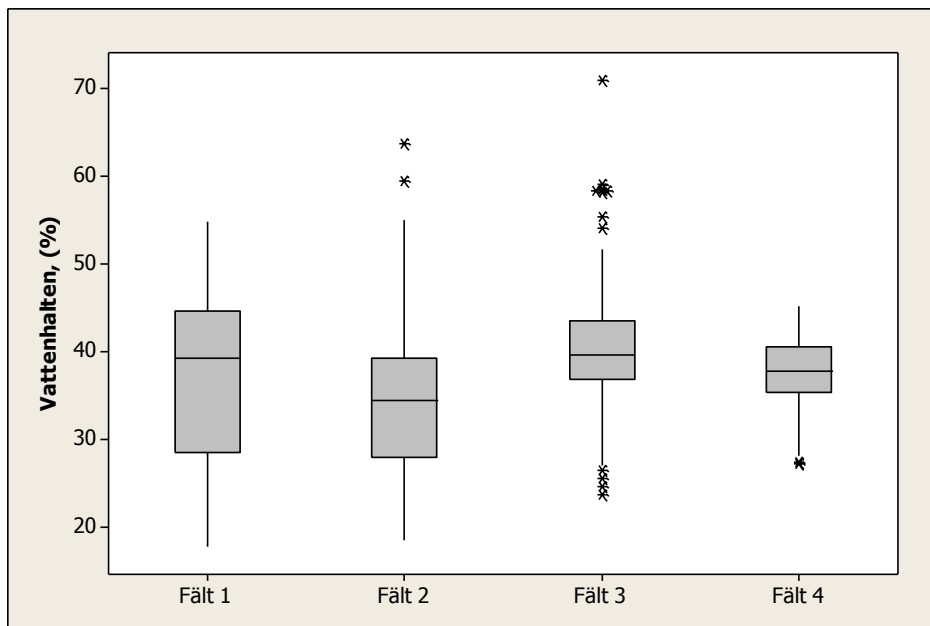
punkter i närheten av vattendrag har i ArcGIS fått ett värde som representerar själva vattendraget, och för att dessa värden inte ska få oproportionellt stor betydelse så har alla värden med en uppströmsarea större än 500 000m² tagits bort. Figur 5 representerar avrinningsområdet där man kan se var TWI är störst respektive minst.



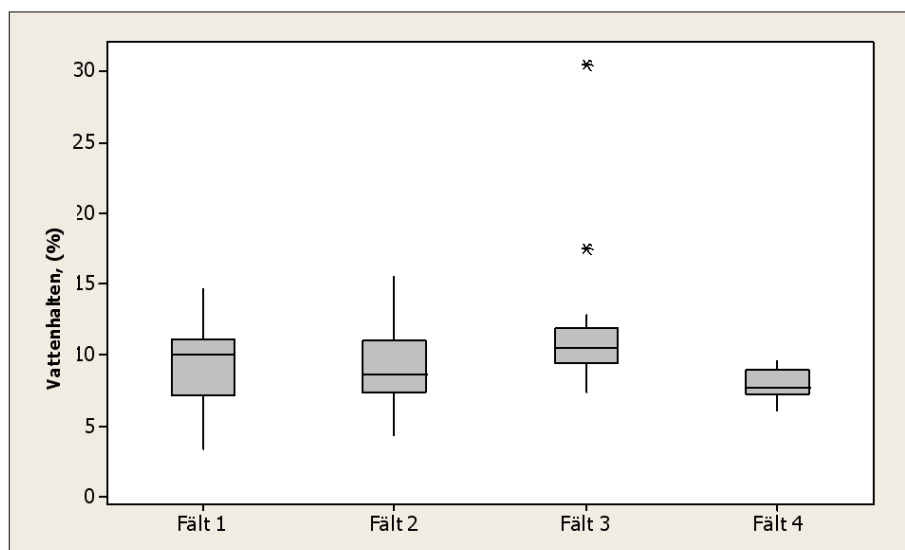
Figur 5: Karta på TWI i avrinningsområdet. Vit till ljusgrå ton representerar ett högt TWI-värde medan mörkgrå till svart färg representerar ett lågt TWI-värde.

Vattenhalten i marken vid tidpunkt 1 och 2

Det finns två stora skillnader mellan de båda mättillfällena. Som det går att se i Figur 6 och Figur 7 så är vattenhalten betydligt högre vid den första mätningen än vid den andra. Den andra stora skillnaden är att vid den första mätningen mättes vattenhalten i markytan på ett stort antal punkter. Vid andra mättillfället mättes markvattenhalten på färre punkter med på flera olika djup. Som man kan se i Tabell 2 var det blötast på 30-40cm nivå medan det var torrast mellan 0-10cm.



Figur 6: Boxplot på vattenhalten vid markytan vid mättillfälle 1. Y-stapeln står för vattenhalten och x-axeln för vilket fält som det gäller. Fält 2 har lägst medianvärde medan Fält 1 och Fält 3 har högst, men staplarna överlappar varandra.



Figur 7: Boxplot på vattenhalten vid mättillfälle 2 som medelvärde i skiktet 0-40 cm. Y-stapeln står för vattenhalten och x-axeln för vilket fält som det gäller. Där det kan ses att Fält 4 har lägst medianvärde medan Fält 1 och Fält 3 har högst.

Tabell 2: Mätresultatet från mätning 2, där vattenhalten mättes på flera olika djup. Minst vatten finns det vid ytan medan mest vatten är det vid 30-40cm.

	0-10	10-20	20-30	30-40	Medel	Antal punkter
Fält 1	5,06	9,78	10,45	12,64	9,48	23
Fält 2	7,66	9,86	8,88	10,12	9,13	18
Fält 3	9,18	12,45	11,13	13,31	11,52	21
Fält 4	7,69	7,37	7,80	9,04	7,98	14
Medel	7,40	9,88	9,56	11,33	9,54	

De fyra fältens TWI

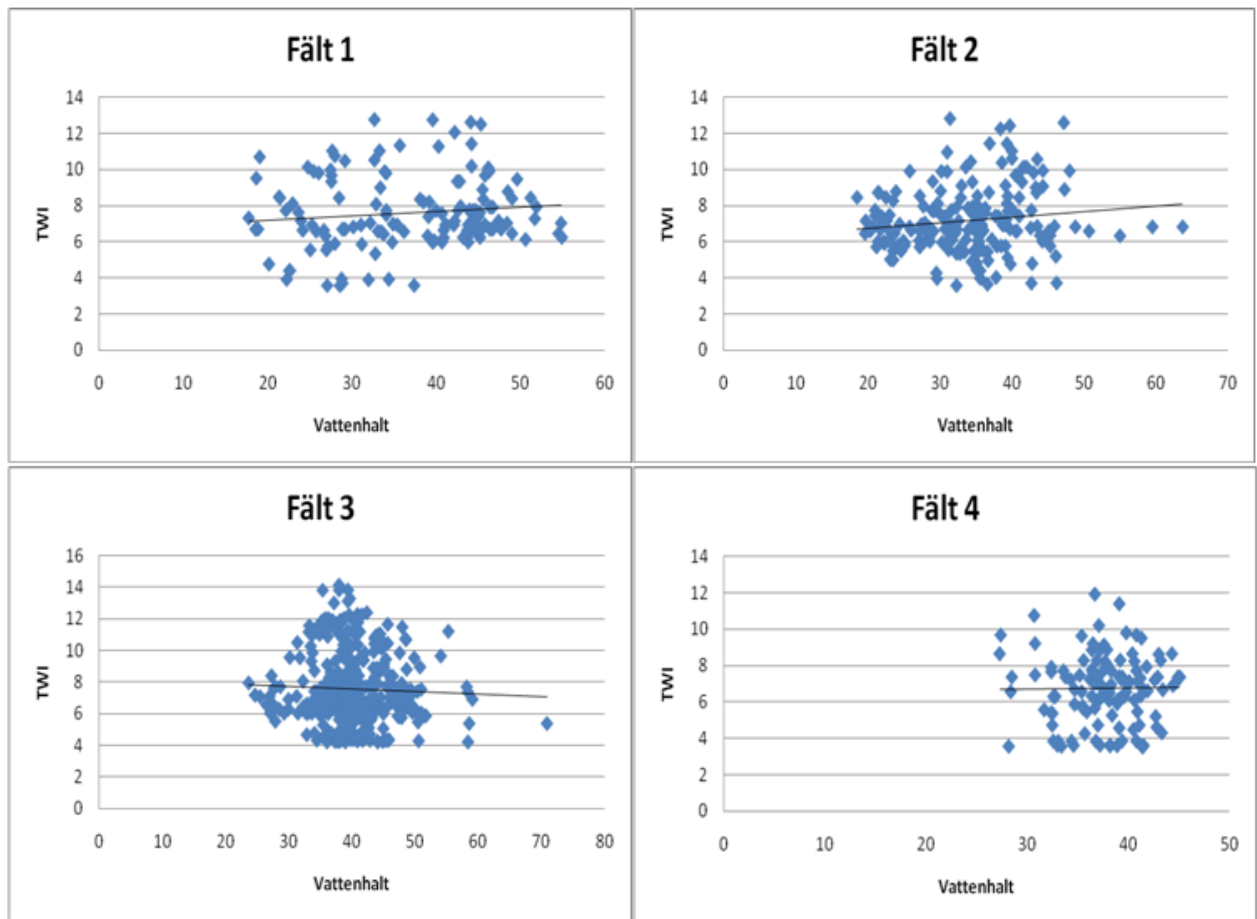
Ett genomsnittligt TWI-värde beräknades från samtliga punkter på de fyra fälten, alltså inte bara i de punkter som det mättes markvattenhalt (se Tabell 3). Enligt dessa beräkningar bör Fält 4 ha den lägsta markvattenhalten, medan det inte borde skilja så mycket mellan övriga fält. Värdet för TWI varierade mycket och standardavvikelsen (1,70-2,18) motsvarade 25-30% av medelvärdet.

Tabell 3: Medel, min, max och standardavvikelse för det genomsnittliga TWI-värdet för samtliga punkter på de fyra fälten, alltså inte bara de punkter där det mättes markvattenhalt.

	TWI medel	TWI min	TWI max	Std. avvikelse
Fält 1	7,74	3,49	14,74	1,95
Fält 2	7,50	3,55	16,35	2,18
Fält 3	7,74	4,13	15,09	2,17
Fält 4	6,61	3,51	11,93	1,70

Jämförelse mellan TWI och Vattenhalten

När resultaten av markvattenhalten från mätningarna vid mätning 1 jämfördes med TWI-värden för samma punkter kunde ingen direkt korrelation ses (Figur 8). För två av fälten (Fält 1 och Fält 2) kunde man se ett svagt samband att vid högre vattenhalt så blev även TWI större. Men detta kunde inte ses för övriga fält.



Figur 8: Jämförelse mellan TWI och vattenhalten för de fyra fälten från mätning 1. X-axeln representerar den uppmätta markvattenhalten och Y-axeln det beräknade TWI-värdet för samma punkt som ur den digitala höjddatamodellen.

I Tabell 4 är endast punkterna där det finns en uppmätt markvattenhalt med i beräkningen.

Tabell 4: Medelvärde, standardavvikelse och antalet punkter av TWI där det finns en provpunkt av markvattenhalten vid antingen mätning 1 eller mätning 2.

		Medelvärde TWI	Standardavvikelse	Antal punkter
Fält 1	Mätning 1	7,61	2,00	139
	Mätning 2	7,50	1,77	21
Fält 2	Mätning 1	7,16	1,81	189
	Mätning 2	6,73	1,52	18
Fält 3	Mätning 1	7,58	2,22	374
	Mätning 2	7,93	2,57	19
Fält 4	Mätning 1	6,73	1,86	118
	Mätning 2	6,91	2,16	14

TWI värden från uppmätta markvattenhalter vid det första mättillfället indikerar att det var blötast på Fält 1 och Fält 3 medan det var torrast på Fält 4 (Tabell 4). Enligt TWI-beräkningarna från mätning 2 var det blötast på Fält 3 medan det var torrast på Fält 2.

Tabell 5: Medelvärde, Standardavvikelse och antalet punkter där markvattenhalten mättes vid mätning 1 och mätning 2 för de olika fälten.

		Medelvärde vattenhalt	Standardavvikelse	Antal punkter
Mätning 1	Fält 1	37,0	9,4	139
	Fält 2	33,8	8,1	189
	Fält 3	40,3	5,8	374
	Fält 4	37,5	3,9	118
Mätning 2	Fält 1	9,48	3,30	23
	Fält 2	9,13	2,79	18
	Fält 3	11,52	7,83	21
	Fält 4	7,98	1,04	14

De faktiska mätningarna (Tabell 5) visar att vid mätning 1 var det blötest på Fält 3 medan det var torrast på Fält 2. Vid mätning 2 var det blötest på Fält 3 medan det var torrast på Fält 4. När resultaten från Tabell 4 och Tabell 5 jämfördes mellan de olika fälten gick det att se vilka skillnader som var signifikanta (Tabell 6).

Tabell 6: Signifikanta skillnader mellan de olika fälten i beräknade TWI värden och uppmätta vattenhalter. Parentesen i Mätning 1 mellan Fält 2 och 4 anger att signifikansen för vattenhalten och TWI visar olika samband.

		Fält 1	Fält 2	Fält 3	Fält 4
Mätn. 1, TWI	Fält 1	-	*	no sign.	* * *
	Fält 2	*	-	*	(*)
	Fält 3	no sign.	*	-	* * *
	Fält 4	* * *	(*)	* * *	-
Mätn. 1, vattenhalt	Fält 1	-	* * *	* * *	no sign.
	Fält 2	* * *	-	* * *	(* * *)
	Fält 3	* * *	* * *	-	* * *
	Fält 4	no sign.	(* * *)	* * *	-
Mätn. 2, TWI	Fält 1	-	no sign.	no sign.	no sign.
	Fält 2	no sign.	-	*	no sign.
	Fält 3	no sign.	*	-	no sign.
	Fält 4	no sign.	no sign.	no sign.	-
Mätn. 2, vattenhalt	Fält 1	-	no sign.	no sign.	no sign.
	Fält 2	no sign.	-	no sign.	no sign.
	Fält 3	no sign.	no sign.	-	* *
	Fält 4	no sign.	no sign.	* *	-

no sign. Ingen significant skillnad
 * marginellt signifikant $p < 0,05$
 ** signifikant $p < 0,01$
 *** högst signifikant $p < 0,005$

Vid mätning 1, med fler provpunkter, fanns flera signifikanta skillnader mellan de olika fälten (Tabell 6). Vid tre konstellationer; mellan Fält 1 och 2, mellan Fält 2 och 3 och mellan Fält 3 och 4 syntes det en signifikant skillnad som tyder på att man kan se ett samband mellan beräknade och uppmätta värden. I övriga fall fanns det ingen signifikant skillnad vare sig för

vattenhalten eller för TWI-värdet mellan fälten. Vid ett tillfälle, mellan Fält 2 och Fält 4, vid första mättillfället visar studien på en signifikant skillnad både vid TWI och vid vattenhalten.

När TWI hade en signifikant skillnad mellan fälten undersöktes även om det innebar en signifikant skillnad hos vattenhalten. Vid mättillfälle 2 sågs ingen signifikant skillnad, anledningen till detta kan vara att det fanns för få provpunkter i denna mätning. Enligt beräknade TWI värden kunde man förvänta sig att Fält 3 skulle vara blötast, och detta visade sig mycket riktigt stämma. Samma tendens gäller Fält 1 som enligt TWI förväntas vara näst mest blött, och vid mätning av vattenhalten visade det sig också att detta var fallet. Fält 2 förväntades ha lägst vattenhalt men enligt fältmätning var det Fält 4 som hade lägst. Detta kan bero på att det fanns vall på Fält 4, medan åkerbönan på Fält 2 inte hunnit lika långt.

Vid mättillfälle 1 visade fem av sex jämförelser mellan fälten en signifikant skillnad, detta gällde både för jämförelse mellan TWI och mellan markvattenhalten. I tre av fallen där en signifikant skillnad av TWI kunde ses fanns det också en signifikant skillnad av markvattenhalten mellan fälten. Detta tyder på att det finns ett samband mellan TWI och markvattenhalten. Men de övriga tre jämförelserna visar inte samma tydliga samband. TWI-värdena skiljde sig signifikant mellan Fält 1 och Fält 4, därför kunde även en skillnad på markvattenhalten förväntas. Detta var dock inte fallet. Enligt TWI fanns ingen signifikant skillnad mellan Fält 1 och Fält 3, medan vattenhalten skiljde sig signifikant enligt mätning. Det uppmättes en signifikant skillnad mellan Fält 2 och Fält 4 för både TWI och markvattenhalten. Det förra värdet var signifikant högre för Fält 2 medan vattenhalten var signifikant lägre och detta medför att det inte gick att dra någon sammantagen slutsats om de teoretiska och uppmätta markvattenhalterna för Fält 2 och 4.

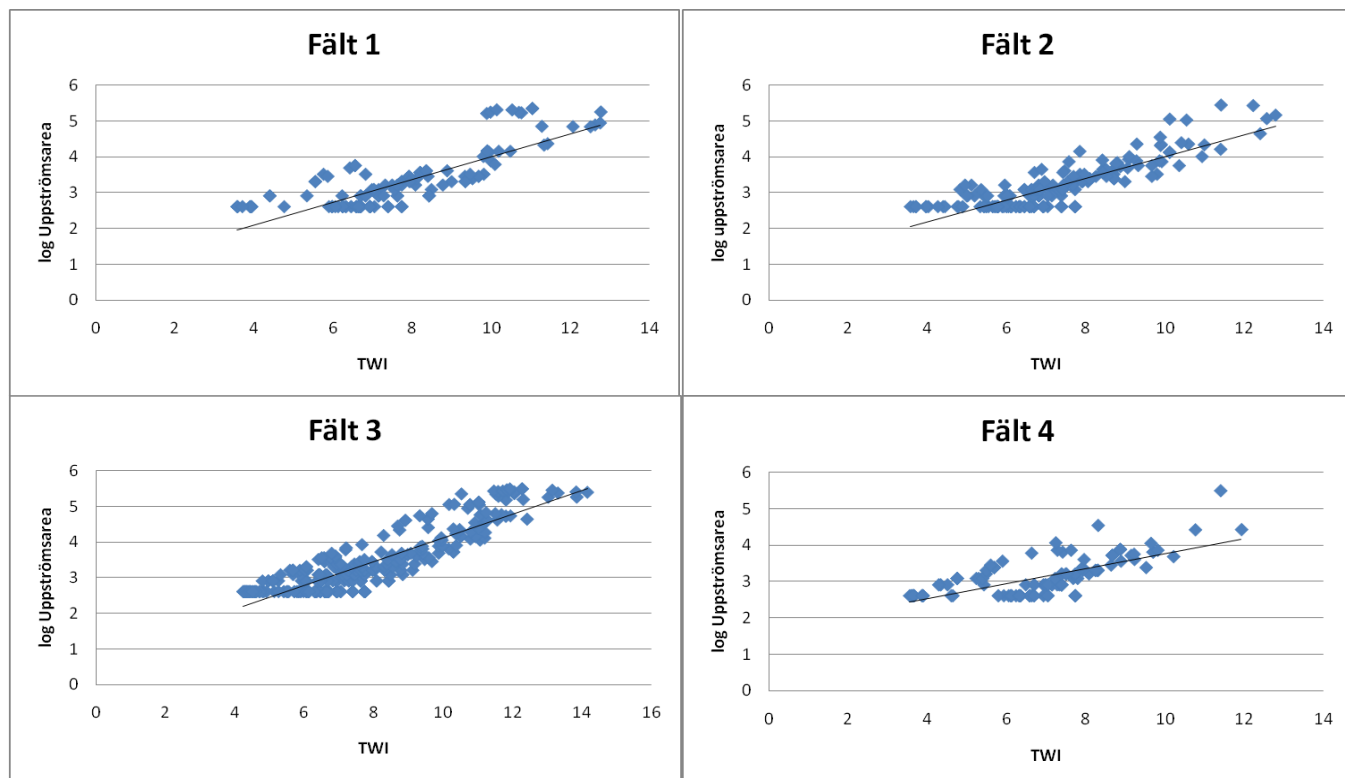
Ackumulerade uppströmsarean

Då resultatet för den ackumulerade arean visar en väldigt stor standardavvikelse valdes det att studera det logaritmiska värdet för att på så vis minska standardavvikelsen (Tabell 7). Enligt den ackumulerade uppströmsarean borde det vara blötast på Fält 3 vilket också stämmer med fältmätningarna.

Tabell 7: Det logaritmiska värdet av den beräknade ackumulerade arean för de fyra fälten. Tabellen visar dels den genomsnittliga ackumulerade arean för hela fältet samt den genomsnittliga ackumulerade arean för punkterna i mätning 1 och mätning 2.

	Log ackumulerad area, medelvärde för hela fältet	Log ackumulerad area, mätning 1	Log ackumulerad area, mätning 2
Fält 1	3,27	3,25	3,07
Fält 2	3,24	3,14	3,06
Fält 3	3,30	3,29	3,54
Fält 4	3,05	3,09	3,19

När TWI-värdet jämfördes med det logaritmiska värdet av uppströmsarean gick det att se ett tydligt linjärt samband (Figur 9).



Figur 9: Jämförelse mellan TWI och logaritmen av den ackumulerade uppströmsarean för de fyra fälten. X-axeln representerar TWI och Y-axeln den logaritmiska uppströmsarean.

Lutningen

En annan parameter som TWI är uppbyggt av är lutningen. Baserat på den större lutningen borde det vid mätning 1 vara torrast på Fält 4 och blötast på Fält 3. Vid mätning 2 borde det vara blötast på Fält 1 och blötast på Fält 4. Anledningen till att lutningen på samma fält är olika vid de olika mätningarna är att det endast togs hänsyn till lutningen i de aktuella provpunkterna i uträkningen (Tabell 8).

Tabell 8: Den genomsnittliga lutningen (i grader) för de fyra fälten. De två lutningarna som omnämns är lutningen vid mätpunkterna vid måttillfälle 1 samt mätpunkterna från måttillfälle 2.

	Mätning 1, lutning	Mätning 1, std.av.	Mätning 2, lutning	Mätning 2, std.av.
Fält 1	5,02	7,87	3,98	7,87
Fält 2	4,86	5,94	6,82	8,31
Fält 3	4,55	5,01	5,29	5,82
Fält 4	8,33	10,4	9,42	10,36

Dränering samt hydraulisk konduktivitet

Vid jämförelse av den hydrauliska konduktiviteten (Tabell 9) tyder detta på att Fält 2 borde ha högst markvattenhalt medan Fält 3 borde ha lägst. En jämförelse av hur långt medelavståndet mellan dräneringsrören är på varje fält leder till samma slutsats (Tabell 9). Detta stämmer dock inte överens med uppmätt resultat där Fält 3 har varit blötast.

Tabell 9: Fältens area samt längden dräneringsrör som finns på fälten. Även om det finns vissa delar av fälten där det inte finns några uppgifter om dräneringsrör så ingår ändå dessa delar som fältens area. Fält 4 saknar uppgifter om dräneringsrör.

	Fältets area	Rörens längd	Medelavstånd mellan rör	Hydraulisk konduktivitet
Fält 1	355 815 m ²	21 934 m	16,2 m	0,012
Fält 2	367 624 m ²	18 372 m	20,0 m	0,007
Fält 3	320 445 m ²	21 266 m	15,1 m	0,054
Fält 4	92 243	Saknar uppgift	Saknar uppgift	0,030

Av de tre fält som det finns uppgifter på om dräneringsrör är det längst mellan rören på Fält 2 medan avståndet är kortast på Fält 3. Därför borde det vara blötast på Fält 2 och torrast på Fält 3, men vid mätning av markvattenhalten visade det sig vara tvärtom. Detta kan tyda på att dräneringen är lagd efter behovet och förklara utjämnade vattenhalter i marken mellan fälten. Den hydrauliska konduktiviteten, jordens förmåga att leda vatten, är minst på Fält 2 och störst på Fält 3, vilket också tyder på att Fält 2 är blötast och Fält 3 torrast. Dessa faktorer borde spela in, och anledningen till att detta inte stämmer kan bero på flera faktorer. Enligt värdet för TWI ska Fält 2 ha förhållandevis lite vatten i profilen och Fält 3 förhållandevis mycket, vilket också är fallet. Om dräneringsavståndet och den hydrauliska konduktiviteten hade varit densamma för båda fälten skulle det antagligen uppmätts en större skillnad i vattenhalt.

Diskussion

När de förväntade TWI-värdena jämfördes med den uppmätta markvattenhalten (Figur 8) kunde inget tydligt samband ses. En anledning till detta kan vara att vid uträkning av vilken riktning som vattnet rinner så förutsätts det att allt vatten i en ruta rinner åt samma håll. Tyvärr kan det aldrig förutspås med 100 % säkerhet hur vattnet i naturen rinner. Med en ännu högre upplösning skulle resultaten bli säkrare. I den här studien var rutorna i den digitala höjdmodellen 20x20 m, dvs. 400 m². Att allt vatten inom denna area skulle rinna åt samma håll är mycket möjligt, men samtidigt är det också ganska troligt att delar av vattnet skulle rinna åt ett annat håll. I nuläget får vissa celler väldigt stora värden och de flesta celler i den digitala höjdmodellen får en väldigt låg ackumulerad uppströmsarea. En modell som skulle innebära att vattnet rann proportionellt beroende på hur stor lutningen är skulle möjligtvis kunna vara bättre. En sådan modell är dock mycket mer komplex (Seibert *m.fl.*, 2007). Vid mycket vatten är det dessutom sannolikt att en del vatten kommer att ta en annan väg än huvudfåran. En annan mätosäkerhet är att GPS-punkterna kan skilja på några meter kan ge ett missvisande resultat.

Den hydrauliska konduktiviteten är inte något medelvärde över hela fältet utan är mätt i en punkt per fält. Det går därför inte med säkerhet säga hur väl denna punkt stämmer överens med övriga delar av fältet. Denna studie fokuserade inte på den hydrauliska konduktiviteten men resultaten indikerade att Fält 1 och 2 borde vara blötast vilket inte stämmer överens med vad mätningar i fält visade.

Naturen är ett komplext system och det är svårt att veta vilka parametrar som spelar in och påverkar markvattenhalten. Dräneringsrören är över 50 år gamla och det kan dessutom även finnas ännu äldre tegelrör på fälten. Osäkerheten kring dräneringsrören är därför ganska stor. Möjligtvis bidrar dräneringsrören till att "balansen" i fältet rubbas, så de exakta punkterna som förväntas vara blötast inte är det. Detta skulle då förklara frånvarandet av samband i figur 8, där det inte kunde ses något tydligt samband mellan TWI och uppmätt vattenhalt, men att detta fält som helhet ändå är blötare än andra fält med en förhållandevis låg TWI. Kanske är det lättare att jämföra större områden än enskilda punkter. Detta är något som man skulle kunna undersöka mer.

Enligt uträknat TWI-värde och logaritmen av den ackumulerade uppströmsarean borde Fält 3 vara det fält som har den högsta markvattenhalten vilket den också har. Men sett till fältets lutning, längden dräneringsrör samt den hydrauliska konduktiviteten borde detta inte vara fallet. Dräneringen och den hydrauliska konduktiviteten behöver kanske inte spela en avgörande för var det finns mest vatten men resultaten har inte givit något entydigt svar på detta.

Ett allmänt problem vid jämförelser mellan fält är att dessa sällan har samma förutsättningar om man bara vill studera en parameter. Olika fält har exempelvis olika grödor som har skiftande vattenupptagningsförmåga. Framför allt har olika fälten vanligen skiftande jordsammansättning. I den här studien är två av fälten belägna på moränkullar och moränen håller inte vattnet lika bra som den styva leran i dalbotten. Även om förutsättningarna blir detsamma inom fälten så blir det stora skillnader i förutsättningarna vid en jämförelse mellan olika fält. Om man vill ha tydliga resultat som visar samband mellan TWI och markvattenhalten mellan olika fält borde man därför utnyttja fält med samma jordart och grödor. Men om man vill använda en metod för att beräkna var det förväntas vara mest vatten

i en jordbruksmark måste den kunna fungera även om fält har t.ex. olika grödor, annars blir urvalet väldigt begränsad. Detta förklarar inte heller varför vi inte kunde se något samband inom de olika fälten. Om detta beror på att det saknas samband eller om det beror på någon felkälla, t.ex. gps:ens osäkerhet, för stora rutor i den digitala höjdmodellen, eller kanske bara slumpen är svårt att säga med säkerhet. Tidigare studier har också visat att modellen fungerar bättre på blötare marker. Det är möjligt att det hade blivit tydligare resultat i den här undersökningen om marken varit blötare vid mätillfällena.

Slutsats

I denna studie återfanns inget entydigt samband mellan TWI och markvattenhalten. Men däremot så avskrivs inte heller möjligheten att det finns ett samband. Då naturen är ett komplext system med många olika parametrar som spelar in är det svårt att dra några säkra slutsatser. Att det är nergrävt ett dräneringssystem gör det antagligen svårare att kunna se tydliga resultat då det är väldigt svårt att veta hur bra olika dräneringssystem fungerar.

Tackord

Ett stort tack till min handledare Barbro Ulén för all hjälp och stöd under det här examensarbetet. Tack även till Faruk Djordjic och Maria Blomberg som hjälpt mig med GIS. Även ett tack till Maria Andersson för all hjälp i fält samt tips på vägen. Slutligen vill jag även tacka Hanna Nilsson som hjälpt mig att få arbetet klart.

Referenser

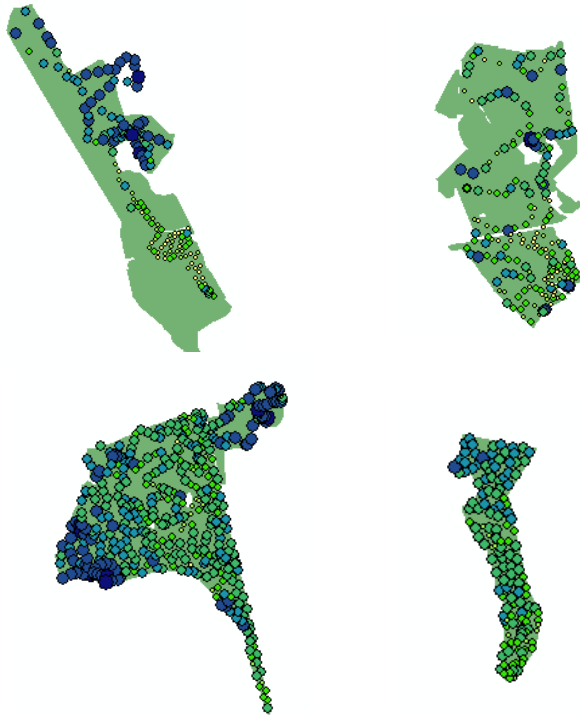
- Beven, K. J. och M. J. Kirkby., 1979. A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, nr 24(1), sid. 43-69.
- Eriksson, J., Nilsson, I. och Simonsson, M., 2005. Wiklanders marklära. Studentlitteratur, Lund, sid 147-159.
- Graysson, R.B., och Western, A. W., Chiew, F.H.S., och Blöschl, G., (1997). Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, 33(12), 2897-2908.
- Grip, H., och Rodhe, A., 2000. Vattnets väg från regn till bäck. Hallgren & Fallgren. Uppsala.
- Jarvis, N.J., 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, vol 58, sid. 523-546.
- O'Callaghan, J.F., och Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, sid. 323-344.
- Quinn, P., Beven, K. Chevallier P. och Planchon, O., 1991. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes*, nr 5, sid. 59-80.
- Quinn, P.F., Beven, K.J & Lamb, R., 1995. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological processes*, vol. 9 nr 2. sid. 161-182.
- Rodhe A., Seibert J., 1999. Wetland Occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators. *Agricultural and Meteorology* 98-99. sid. 325-340.
- Seibert, J. och McGlynn, B. L., 2007. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research* vol 43.
- Singer, M.J. & Munns, D.N., 1992. SOILS: An Introduction. Second ed. Maxwell Macmillan International Editions, sid. 99-113.
- Szejba, B., Cymes, I., Statyłowicz, J. & Szymczyk, S., 2009. An impact of drainage system on soil water conditions at Lidzbark Warminski experimental site. *Biologia* nr. 64/3, sid. 565-569.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* vol 33, nr 2, sid. 309-319.
- Townsend, P.A., och Walsh, S.J., 1996. Estimation of soil parameters for assessing potential wetness: comparison of model responses through gis. *Earth surface processes and landforms*, vol. 21, sid. 307-326.

Ulén, B., Djordjic, F., Etana A., Johansson, G & Lindström J. 2011 The need for an improved risk index phosphorus losses to water from tile-drained agricultural land *Journal of Hydrology*. Published on-line 2011-03-06. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.038

van Beers, W.F.J., 1983. The auger hole method. Report from Institute for Land Reclamation, Wageningen, sid 26.

Appendix

Provpunkterna från den första mätningen på de fyra fälten. Mörkblått indikerar hög vattenhalt



Provpunkterna från den andra mätningen med vattenmängden för alla fyra djupen. Ju högre stapel desto mer vatten.

